

УДК 624.15.001

А.В.ШАПОВАЛ, канд. техн. наук

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
г.Днепропетровск*

В.И.МАРЧЕНКО

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

Представлены результаты определения деформационных и реологических характеристик водонасыщенного грунта, находящегося под действием циклической нагрузки, различными способами. Установлено, что наиболее достоверные результаты получены с использованием модели упруговязкопластического основания.

Представлено результати визначення деформаційних та реологічних характеристик водонасиченого ґрунту, що знаходиться під впливом циклічного навантаження, різними способами. Встановлено, що найбільш достовірні результати отримані з використанням моделі пружнов'язкопластичної основи.

The results of deformative and rheological characteristics determination of water-saturated soil under the influence of cyclic load are presented. It is established that more valid findings was obtained from elastic-viscous-plastic modeling of base.

Ключевые слова: циклическая нагрузка, консолидация, ползучесть, водонасыщенный грунт, компрессионные испытания.

Учет необратимости деформаций грунта необходим при расчете осадки оснований, находящихся под воздействием циклической и динамической нагрузки.

Ю.К. Зарецкий и В.А. Флорин для описания ползучести грунтов предложили использовать уравнения Вольтерра с разностным ядром [1-5]. Недостаток этого подхода – в возможности учета только упругих и вязких деформаций грунта [2, 5, 6].

На наш взгляд, заслуживает внимания опыт использования авторами монографии [7] уравнений Вольтерра второго рода с составным ядром ползучести для одновременного учета упругих, вязких и пластических деформаций и их трансформации во времени. При этом заслуживают внимания методики [8, 9] определения входящих в модель [7] материальных констант.

В настоящей работе представлены результаты обработки данных компрессионных испытаний водонасыщенного глинистого грунта различными методами с целью определения входящих в модель материальных постоянных.

При написании настоящей статьи мы преследовали цель определения входящих в различные модели грунтовых оснований материальных констант и сопоставление полученных кривых «осадка – время» и «осадка – нагрузка» друг с другом и экспериментальными зависимостями.

При компрессионных испытаниях в одометре (высота кольца $h = 35$ мм; его внутренний диаметр $D = 71$ мм) водонасыщенной глинистой пасты (ее физические свойства представлены в табл.1) ступенчато-возрастающей нагрузкой (рис.1) регистрировались зависимости «осадка – время», представленные на рис.2.

Таблица 1 – Физические свойства глинистой пасты

№ п/п	Наименование характеристики	Удельный вес скелета пасты γ_d , кН/м ³		
		14,6	15,2	15,8
1	Удельный вес частичек грунта γ_s , кН/м ³	26,8	26,8	26,8
2	Удельный вес грунта γ , кН/м ³	19,1	19,5	19,8
3	Влажность w , д.ед	0,31	0,28	0,25
4	Коэффициент водонасыщения S_r , д. ед	0,90	0,90	0,90
5	Коэффициент пористости e , д. ед	0,85	0,76	0,70

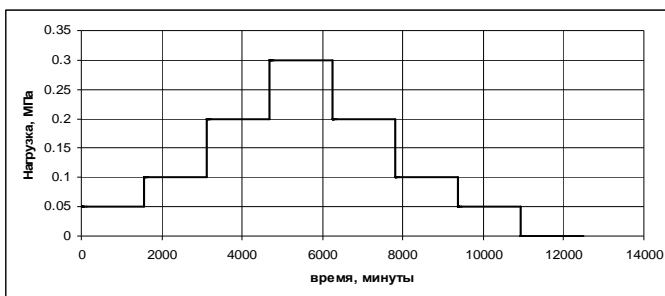


Рис.1 – Зависимость «осадка – нагрузка», принятая в ходе испытаний грунта

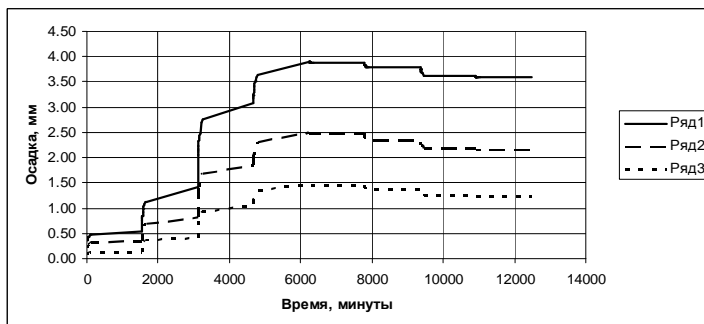


Рис.2 – Экспериментальные зависимости «осадка – нагрузка»:
ряд 1 – удельный вес скелета грунта 14,6 кН/м³; ряд 2 – 15,2 кН/м³; ряд 3 – 15,8 кН/м³.

Обработка экспериментальных данных выполнялась по такому алгоритму. Вначале с использованием нормативной методики [10] нами были установлены деформационные свойства водонасыщенного упругого основания и его реологические свойства.

Далее аналогичные исследования выполнены с использованием изложенной [8] методики. При этом в качестве расчетной была принята модель упругопластического водонасыщенного основания. После этого были рассчитаны соответствующие нагрузке на рис.1 теоретические зависимости «осадка – время». Полученные в ходе обработки экспериментальных кривых материальные константы, соответствующие модели водонасыщенного упругого основания, представлены в табл.2.

Таблица 2 – Материальные константы модели упругого водонасыщенного основания

№ п/п	Наименование характеристики	Удельный вес скелета грунта, кН/м ³		
		14,6	15,2	15,8
1	Компрессионный модуль общей деформации a_k , МПа	2,67	4,35	9,02
2	Компрессионный модуль упругости a_k^y , МПа	35,0	31,0	45,7
3	Коэффициент Пуассона ν , д.ед.	0,35	0,35	0,35
4	Модуль общей деформации грунта E , МПа	3,28	5,36	11,11
5	Модуль упругости грунта E^y , МПа	43,12	38,05	56,25
6	Коэффициент фильтрационной консолидации c_k , м ² /год.	0,35	0,43	0,78
7	Коэффициент фильтрации k_f , см/с	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$7,52 \cdot 10^{-8}$	$6,61 \cdot 10^{-8}$

При этом для определения модуля компрессионного сжатия a_k была использована известная формула [2, 3]

$$S_{st} = q \cdot \frac{h}{a_k} = q \cdot \frac{h}{\lambda + 2 \cdot G} = q \cdot \frac{h}{E} \cdot \frac{1 - \nu - 2 \cdot \nu^2}{1 - \nu}, \quad (1)$$

где S_{st} – стабилизированная осадка образца; q – приложенная к нему нагрузка; h – высота образца; $a_k = \lambda + 2G$ – модуль компрессионного сжатия грунта; λ и G – упругие константы Ламе; E – модуль общей деформации грунта; ν – коэффициент Пуассона грунта.

Компрессионный модуль общей деформации грунта определялся по ветви загрузки, а компрессионный модуль упругости – по ветви разгрузки образца. Коэффициент Пуассона согласно рекомендациям [10] принимался равным $\nu = 0,35$, а модуль общей деформации E определялся по формуле

$$E = a_k \cdot \frac{1 - \nu}{1 - \nu - 2 \cdot \nu^2}. \quad (2)$$

Коэффициент консолидации c_k определялся методом А. Kazanpande. Для этого использовались представленные на рис.3 кривые, по которым определялось время достижения 50% консолидации. Коэффициент консолидации рассчитывался по известной формуле

$$c_k = 0,049 \cdot h^2 / t_{50}, \quad (3)$$

где h – высота образца грунта, а t_{50} – время достижения степенью консолидации 50%.

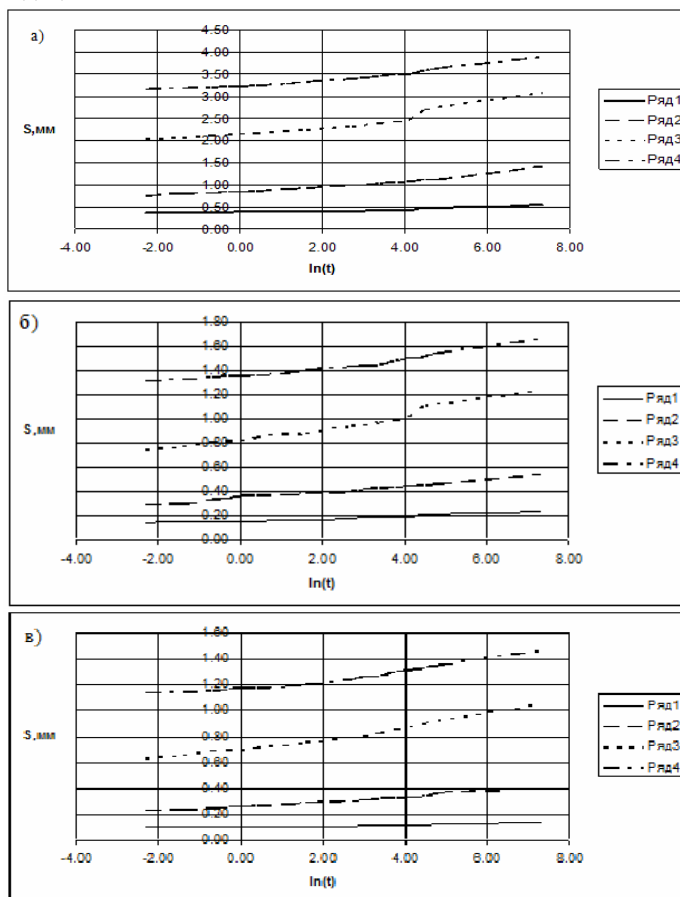


Рис.3 – Графическая интерпретация определения коэффициента консолидации (ветвь загрузки):

а – $\gamma_d = 14,6 \text{ кН/м}^3$; б – $\gamma_d = 15,2 \text{ кН/м}^3$; в – $\gamma_d = 15,2 \text{ кН/м}^3$;

1 – давление $P = 0,05 \text{ МПа}$; 2 – то же, $P = 0,1 \text{ МПа}$; 3 – $P = 0,2 \text{ МПа}$; 4 – $P = 0,3 \text{ МПа}$.

После этого по формуле

$$k_{\phi} = c_k \cdot \gamma_w / a_k, \quad (4)$$

где γ_w – удельный вес воды, определялся коэффициент фильтрации грунта.

В ходе определения материальных констант грунта в рамках модели водонасыщенного упругопластического основания ядро ползучести грунта принималось в виде:

$$K(\tau) = \sum_{i=1}^9 \gamma_i \cdot \exp(-\lambda_{i,i} \cdot \tau), \quad (5)$$

где τ – имеющий размерность времени параметр, а λ_i и $\gamma_{i,i}$ – имеющие размерность 1/сут. параметры ползучести.

Согласно [8] для упругопластического грунта зависимость осадки от времени имеет вид:

$$S(t) = S^{\phi}(t) + \int_0^t S^{\phi}(\tau) \cdot K(\tau) \cdot d\tau, \quad (6)$$

где $S(t)$ – осадка образца в момент времени t ; $S^{\phi}(t)$ – то же, обусловленная фильтрационной консолидацией.

В свою очередь, согласно [4], для каждой из ступеней нагрузки обусловленная фильтрационной консолидацией осадка образца определялась по формуле

$$S^{\phi}(t) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta q_j \cdot h}{a_k^y} \cdot \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot c_k}{h^2} \cdot (t - t_j) \right] \right\}, \quad (7)$$

где t_j – момент времени, в который к образцу приложена очередная ступень нагрузки Δq_j ; $U(t - t_j)$ – ступенчатая функция Хевисайда [8].

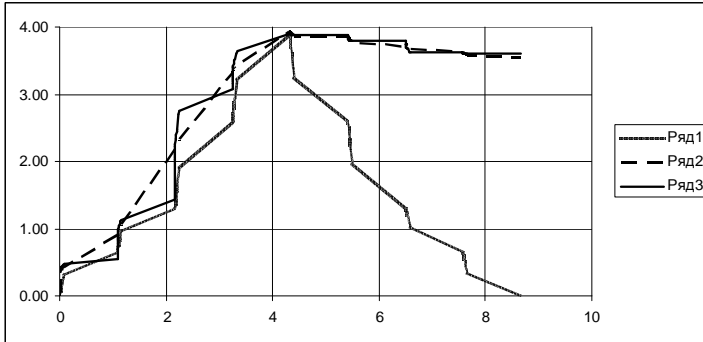
Результаты расчета входящих в выражения (5)-(7) материальных констант приведены в табл.3.

Далее был выполнен контроль полученных в рамках различных моделей основания материальных констант. Для этого с использованием представленных в табл.2, 3 данных и формул (6) и (7) были построены теоретические зависимости осадок образцов от времени.

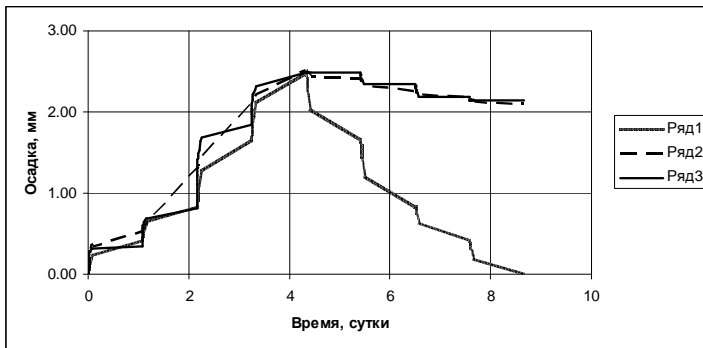
Для удобства анализа эти данные представлены в графической форме (рис.4). При этом на этих рисунках также показаны экспериментальные кривые.

Таблица 3 – Модель упругопластического водонасыщенного основания.
Материальные константы

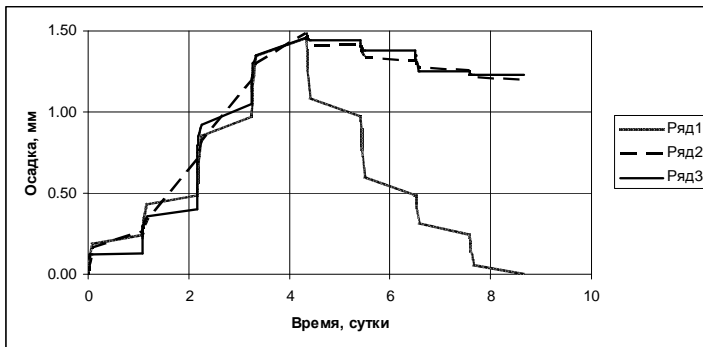
№ п/п	Наименование характеристики	Удельный вес сухого грунта, кН/м ³		
		14,6	15,2	15,8
1	Компрессионный модуль общей деформации a_k , МПа	-	-	-
2	Компрессионный модуль упругости a_k^y , МПа	48,89	45,43	32,28
3	Коэффициент Пуассона ν , д. ед.	0,35	0,35	0,35
4	Модуль общей деформации грунта E , МПа	-	-	-
5	Модуль упругости грунта E^y , МПа	60,24	56,09	39,78
6	Коэффициент фильтрационной консолидации c_k , м ² /год.	0,35	0,43	0,78
7	Коэффициент фильтрации k_{ϕ} , см/с	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$7,52 \cdot 10^{-8}$	$6,61 \cdot 10^{-8}$
8	Параметр ядра ползучести γ_1 , сут ⁻¹	70,45	55,43	22,12
9	Параметр ядра ползучести γ_2 , сут ⁻¹	-119,83	-107,55	22,99
10	Параметр ядра ползучести γ_3 , сут ⁻¹	14,97	71,20	-91,28
11	Параметр ядра ползучести γ_4 , сут ⁻¹	548,66	114,04	20,74
12	Параметр ядра ползучести γ_5 , сут ⁻¹	-631,04	-83,78	86,75
13	Параметр ядра ползучести γ_6 , сут ⁻¹	112,62	-0,40	-48,85
14	Параметр ядра ползучести γ_7 , сут ⁻¹	25,28	-58,25	-3,33
15	Параметр ядра ползучести γ_8 , сут ⁻¹	-60,51	-48,10	-5,29
16	Параметр ядра ползучести γ_9 , сут ⁻¹	83,17	80,63	6,58
17	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,1}$, сут ⁻¹	1,23	1,32	1,03
18	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,2}$, сут ⁻¹	2,46	2,64	2,06
19	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,3}$, сут ⁻¹	3,69	3,96	3,09
20	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,4}$, сут ⁻¹	4,92	5,28	4,12
21	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,5}$, сут ⁻¹	6,15	6,60	5,15
22	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,6}$, сут ⁻¹	7,38	7,92	6,18
23	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,7}$, сут ⁻¹	8,61	9,24	7,21
24	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,8}$, сут ⁻¹	9,84	10,56	8,24
25	Параметр ядра ползучести $\gamma_{1,9}$, сут ⁻¹	11,07	11,88	9,27



a



б



в

Рис.4 – Зависимости осадки грунтового образца от времени:

a – удельный вес сухого грунта $\gamma_d = 14,6 \text{ кН/м}^3$; *б* – $\gamma_d = 15,2 \text{ кН/м}^3$; *в* – $\gamma_d = 15,8 \text{ кН/м}^3$; ряды 1 и 2 – теория; ряд 3 – эксперимент (ряд 1 – модель упругого водонасыщенного основания; ряд 2 – модель упругопластического водонасыщенного основания).

Изложенные в настоящей статье материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. Установленные различными методами значения упругих констант, коэффициента консолидации и коэффициента фильтрации грунта близки между собой.

2. Полученные различными методами величины материальных констант грунта имеют хорошее соответствие с их значениями для суглинков [3, 5, 10].

3. Рассчитанные в рамках модели упругого водонасыщенного основания осадки (кривые 1 на рис.4) существенно отличаются от экспериментальных (кривые 3 на рис.3). При этом наибольшее различие имеет место в области разгрузки.

4. Рассчитанные в рамках модели упругопластического водонасыщенного основания осадки (кривые 2 на рис.4) близки к экспериментальным (кривые 3 на рис.4). При этом наибольшее различие имеет место в момент изменения нагрузки на образец. Это обусловлено тем, что в начальный момент времени обусловленные фильтрационной консолидацией осадки грунтового образца равны нулю. Последнее, в свою очередь, не дает проявиться мгновенным пластическим деформациям грунта. Отметим, что в случае пространственной задачи имеет более полное, чем при компрессии соответствие рассчитанных в рамках модели упругопластического водонасыщенного основания и экспериментальных кривых. Это объясняется тем, что в данном случае имеется возможность проявления мгновенных пластических деформаций сдвига.

1. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений / В. Вольтерра. – М.: Наука, 1982. – 304 с.

2. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов / Ю.К. Зарецкий. – М.: Наука, 1967. – 270 с.

3. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов / Ю.К. Зарецкий. – Ростов-на-Дону: Ростов. ун-т, 1989. – 608 с.

4. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 840 с.

5. Флорин В.А. Основы механики грунтов / В.А. Флорин. – Л. - М.: Госстройиздат, 1959-1961. Т.1. – 1959. – 357 с.; Т.2. – 1961. – 543 с.

6. Кристиансен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристиансен. – М.: Мир, 1974. – 338 с.

7. Шаповал А.В. Теория взаимосвязанной фильтрационной консолидации: монография / А.В. Шаповал, В.Г. Шаповал. – Днепрпетровск: Пороги, 2009. – 311 с.

8. Шаповал А.В. К вопросу моделирования упруговязкопластического поведения грунта под изменяющейся во времени нагрузкой / А.В. Шаповал, В.Г. Шаповал, В.В. Крысан, Е.В. Нестерова, Ю.Л. Винников, В.И. Марченко // Тр. XII междунар. симпозиума по реологии грунтов. – Казань: КГАСУ, 2012. – С.116-120.

9. Шаповал В.Г. Ускоренное определение реологических свойств водонасыщенных глинистых оснований: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Шаповал Владимир Григорьевич. – Днепрпетровск, 1984. – 179 с.

10. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і реформованості / Державний комітет України у справах містобудування та архітектури. – К.: МНТКС, 1997. – 101 с.

Получено 18.05.2012

УДК 624.131.55

В.А.АЛЕКСАНДРОВИЧ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ПРИНЦИП НАСЛЕДСТВЕННОСТИ БОЛЬЦМАНА-ВОЛЬТЕРРА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

Рассматривается применение теории наследственной ползучести при определении осадки фундамента, подверженного динамической нагрузке.

Розглядається застосування теорії спадкової повзучості при визначенні осідання фундаменту, підданого динамічному навантаженню.

Heritable creep theory application to estimate settling of foundation exposed to dynamic loading is considered.

Ключевые слова: виброползучесть, грунт, фундамент.

Динамическая нагрузка, передаваемая работающей машиной через фундамент на основание, в некоторых случаях способна привести к длительной медленно-затухающей осадке фундамента. Такое явление, имеющее название виброползучесть, имеет место, в случае если основание сложено мелкозернистым песком (особенно водонасыщенным) и если амплитуда колебаний при действующем статическом давлении превышает некоторую величину, именуемую критической.

В работах [1, 2] при рассмотрении данного вопроса использовались понятия коэффициента виброползучести грунтов и была предпринята первая попытка применения теории наследственной ползучести с использованием только ядра Абеля, которые приводят к описанию процесса с помощью степенного закона

Рассмотрим, подробнее, применение аппарата наследственной ползучести для учета дополнительной осадки фундамента вследствие виброползучести.

Любая механическая модель деформируемого тела может быть представлена как некоторая система, состоящая из упругих и вязких элементов [3]. Упругий элемент схематически можно изобразить в виде пружины (рис.1, а). В этом случае удлинение элемента пропорционально приложенной силе P , т.е.

$$\delta_y = k_1 P. \quad (1)$$